

# ANALISIS DAN APLIKASI PRA-PEMBEBANAN

Oleh

Ir. Agus Darmawan Adi, M.Sc. \*)

## Intisari

Suatu lahan di Glasgow (UK), dirancang untuk dikembangkan. Bangunan yang akan dibuat berupa dua gudang dari rangka portal baja.

Penyelidikan tanah melaporkan bahwa tanah setempat terdiri atas sebagian besar endapan aluvial yang terletak di atas endapan glacial. Lempung berlanau, lanau berlempung, dan humus dijumpai di dalam endapan aluvial. Tanah-tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang sangat tinggi.

Pra-pembebanan dilaksanakan di lahan tersebut untuk mengurangi penurunan yang berlebihan yang mungkin terjadi, dan meningkatkan kuat geser tanah. Pekerjaan ini ternyata berhasil dengan baik. Penurunan yang diperkirakan dari data laboratorium lebih besar dari yang diperkirakan dari pra-pembebanan, dan kedua perkiraan tersebut masih lebih besar dari pengamatan setelah pembangunan.

## Pendahuluan

Suatu areal di Nether Auldhous/Cogan Road Glasgow (UK), dirancang untuk dikembangkan menjadi daerah perdagangan dan beberapa bangunan akan didirikan di areal ini. Komplek baru direncanakan berupa dua gudang yang terbuat dari rangka portal baja dengan beban sekitar 115 kN untuk kolom luar, 620 kN untuk kolom dalam, dan sekitar 30 kN/m<sup>2</sup> untuk plat lantai.

Penyelidikan tanah telah dilaksanakan di areal ini untuk mendapatkan informasi keadaan tanah, dan untuk memutuskan jenis-jenis fondasi yang cocok untuk bangunan di lokasi ini. Penyelidikan meliputi : penyelidikan lapangan, berupa 14 titik bor yang tersebar di seluruh areal disertai pengambilan contoh-contoh tanah asli (*undisturbed samples*), dan pemeriksaan laboratorium atas contoh-contoh tanah yang diambil.

## Kondisi Tanah

Lapisan paling atas berupa tanah urug dengan ketebalan 1.60 - 3.20 meter, terdiri atas campuran lem-

pung, pasir, batu/kerikil, dan puing-puing bongkaran bangunan. Kondisi lapisan ini tidak beraturan baik kepadatan maupun ketebalannya. Lapisan di bawahnya berupa endapan aluvial yang umumnya terdiri atas lempung berlanau dan lanau berlempung lunak yang kadang-kadang terdapat lensa-lensa lanau berpasir, lempung berlanau *laminates* dengan kondisi lunak sampai *stiff*, dan lanau berlempung lunak. Endapan aluvial mempunyai ketebalan sekitar 8.0 — 9.50 meter. Di sebagian besar areal dijumpai lapisan humus (*peat*) pada kedalaman sekitar 3.5 meter dengan ketebalan antara 0.40 — 1.00 meter. Endapan *glacial* di bawah endapan aluvial terdiri atas lempung berpasir coklat tua yang sangat keras dengan batu-pasir dan serpihan kerikil/batu, dan mengandung lensa-lensa pasir kasar padat. Penyelidikan dihentikan setelah menembus endapan *glacial* lebih dari 3.0 meter dan ternyata lapisan tersebut masih menerus. Air tanah dijumpai pada kedalaman 1.30 — 1.60 meter di bawah muka tanah. Skema lapisan-lapisan tanah hasil penyelidikan beserta parameter kuat geser dan kompresibilitas, dirangkum dalam Gambar 1.

## Pemilihan Fondasi

Informasi hasil penyelidikan tanah dipertimbangkan telah cukup untuk menyelesaikan masalah

\*) Staf pengajar Jurusan Teknik Sipil FT UGM

fondasi di lokasi penyelidikan. Tanah urug mempunyai variabel dalam komposisi dan kepadatannya serta umumnya terkonsolidasi tidak beraturan. Lapisan ini akan mempunyai kekuatan yang berbeda-beda dan dikhawatirkan terjadi perbedaan penurunan yang besar, sehingga dipertimbangkan untuk meletakkan fondasi di lapisan di bawahnya.

Lapisan di bawahnya yang berupa lempung berlanau umumnya lebih baik dengan ketebalan sekitar 1.50 meter. Sayangnya di sebagian areal pada kedalaman tersebut dijumpai lapisan tanah humus, dan lapisan yang mendasarinya berupa lanau berlempung yang sangat lunak dan cukup tebal.

Pemilihan fondasi mengarah pada penggunaan fondasi tiang yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras dengan kedalaman sekitar 11.00 meter, dan fondasi dangkal dengan perbaikan tanah untuk menghindari penurunan yang besar dan berbeda-beda. Penggunaan fondasi tiang dapat menyelesaikan masalah pada fondasi kolom-kolom bangunan tetapi belum dapat menyelesaikan fondasi lantai yang cukup luas.

Analisis fondasi dangkal (telapak setempat/pelat), dengan anggapan dasar fondasi kolom pada kedalaman 1.0 meter di bawah muka tanah, ukuran fondasi kolom dalam (beban 620 kN)  $3.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ , ukuran fondasi kolom luar (beban 115 kN)  $1.25 \text{ m} \times 1.25 \text{ m}$ , dan pelat lantai terletak di atas muka tanah, ternyata kapasitas dukung tanah tidak menjadikan masalah. Tetapi penurunan-penurunan yang akan terjadi pada pelat lantai berkisar antara 100 sampai 145 mm, kolom luar antara 55 sampai 70 mm, dan kolom dalam antara 95 sampai 125 mm. Analisis penurunan tersebut dihitung berdasarkan penyebaran tekanan dari Janbu, Bjerrum, Kjaernsli, 1956 (Gambar 2).

Besarnya penurunan tersebut akan menjadi masalah yang serius, sehingga penyelesaian yang dianggap paling tepat adalah perbaikan tanah di lokasi tersebut untuk mempercepat penurunan sebelum dibangun dan sekaligus menaikkan kekuatan tanah.

Beberapa cara perbaikan tanah telah dipertimbangkan untuk menetapkan cara yang paling tepat untuk jenis tanah dan keadaan lingkungan. Alternatif perbaikan tanah dengan cara-cara : pemadatan dinamik, *vibroflotation*, *vibro-displacement*, dan injeksi (*grouting*) telah disingkirkan karena tidak cocok

dengan keadaan tanah yang umumnya lempungan dan kondisi lingkungan yang padat dengan aktivitas.

Cara perbaikan tanah yang dianggap paling cocok adalah pra-pembebanan (*pre-loading*). Ketebalan lapisan yang mungkin memberikan kontribusi penurunan pada beban rencana berkisar antara 5 sampai 6 meter. Dengan kondisi tanah yang ada, lapisan tanah urug yang berupa material granuler dan lapisan lempung atau lanau lempung atau humus yang berlapis-lapis, memungkinkan proses konsolidasi dapat berlangsung cepat karena permeabilitas tanah cukup besar. Dengan demikian penggunaan pra-pembebanan lebih menguntungkan dibandingkan penggunaan fondasi dalam.

Pemasangan alat-alat untuk pemantauan kelakuan tanah selama pra-pembebanan merupakan hal yang harus dilakukan untuk memberikan informasi terbaik untuk memperkirakan daya guna bangunan selanjutnya. Hobbs (1986) menyatakan bahwa pekerjaan pra-pembebanan secara teknik lebih baik dilaksanakan di lapangan daripada di laboratorium, dan percobaan lapangan dengan skala besar dengan pembebanan segera merupakan hal mendasar untuk proyek penting.

## Pra-Pembebanan

### Prinsip Kerja

Penurunan dan perbedaan penurunan dari fondasi di atas tanah lempung kompresibel, tanah granular lepas, atau material urug dapat sangat berkurang dengan penggunaan pra-pembebanan pada areal yang akan dibangun. Pra-beban diberikan berupa timbunan tanah atau material lain di atas tanah, sama atau lebih besar dari beban rencana struktur, tetapi pra-beban harus kurang dari kapasitas dukung ultimit tanah dasar untuk mencegah keruntuhan.

Material pra-beban dидiamkan sampai jangka waktu tertentu, sampai kurva waktu-penurunan yang diperoleh menunjukkan datar atau penurunan mencapai tingkat yang sangat rendah. Prinsip pelaksanaan tersebut disampaikan oleh Das (1984), yang secara skematis diperlihatkan pada gambar 3.

Cara ini dapat digunakan secara efektif pada kedalaman lapisan kompresibel yang terbatas. Untuk

lapisan kompresibel yang sangat tebal, kecepatan penurunan mungkin sangat lambat sehingga perlu waktu sangat lama untuk mencapai suatu derajat konsolidasi. Kecepatan konsolidasi dapat dipercepat dengan mengurangi lintasan drainasi dengan memasang drainasi vertikal. Drainasi vertikal dapat berbentuk tiang-tiang pasir atau dari geotekstil. Dengan pemakaian drainasi vertikal, ketebalan lapisan yang terpengaruh oleh pra-pembebanan dapat mencapai 20 — 30 Meter.

### Analisis

Analisis pra-pembebanan meliputi dua tahapan yaitu stabilitas dan tinggi (intensitas) pra-beban yang berkaitan dengan waktu pembebanan.

Stabilitas dikaitkan dengan keberhasilan pra-pembebanan, dengan memperkirakan penurunan bangunan rencana berdasarkan parameter penurunan setelah pelaksanaan pra-pembebanan. Parameter penurunan diambil dari kurva balik (pengurangan beban) pada pengujian konsolidasi di laboratorium, sebagaimana disajikan dalam Tabel 1.

Berdasarkan asumsi nilai  $m_v$  tersebut dan dengan mengambil nilai tambahan tekanan efektif rata-rata dari bangunan antara lapisan-lapisan pada Gambar 2, perkiraan penurunan fondasi di atas tanah yang diperbaiki dengan pra-konsolidasi disajikan pada tabel-tabel 2, 3 dan 4.

Analisis stabilitas menunjukkan hasil yang memuaskan untuk perkiraan penurunan setelah pra-pembebanan. Penurunan yang diperkirakan setelah pra-pembebanan sekitar 23 mm di bawah pelat lantai, sekitar 15 mm di bawah kolom dalam, dan sekitar 9 mm di bawah kolom tepi. Hasil-hasil tersebut masih dalam batas-batas yang dapat ditolerir untuk suatu struktur.

Tinggi pra-beban dihitung dengan menganggap pembebanan dilaksanakan selama 1 bulan (syarat pelaksana) dengan nilai koefisien konsolidasi  $C_v$ , sebesar  $20 \text{ m}^3/\text{tahun}$ . Hasil pengujian laboratorium memberikan nilai  $C_v$ , rata-rata =  $2.35 \text{ m}^3$ , tetapi berdasarkan pengalaman, pada tanah lempung yang laminated nilai  $C_v$  jauh di atas hasil pengujian laboratorium yang ukuran sampelnya relatif sangat kecil.

Tabel 1. Asumsi nilai  $m_v$  setelah pra-pembebanan

Lapisan	Kedalaman (m)	$m_v$ ( $\text{m}^2/\text{MN}$ )
1	0.0 — 2.0	0.09
2	2.0 — 3.5	0.07
3	3.5 — 4.5	0.07
4	4.5 — 8.0	0.07
5	8.0 — 11.0	0.07
6	> 11.0 penurunan dapat diabaikan	

Tabel 2. Perkiraan penurunan di bawah pelat lantai

Lapisan	$\delta p$ ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	$\delta H$ (m)	$\delta_{\text{oed}}$ (mm)
1	0.0298	2	5.3
2	0.0295	1.5	3.0
3	0.0292	1.0	2.0
4	0.0286	3.5	7.0
5	0.0271	3	5.6
Penurunan total =			22.9 mm

Tabel 3. Perkiraan penurunan di bawah kolom dalam

Lapisan	$\delta p$ ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	$\delta H$ (m)	$\delta_{\text{oed}}$ (mm)
1	0.0634	2	5.7
2	0.0437	1.5	4.5
3	0.0199	1.0	1.3
4	0.0082	3.5	2.0
5	0.0048	3	1.0
Penurunan total =			14.5 mm

Tabel 4. Perkiraan penurunan di bawah kolom luar

Lapisan	$\delta p$ ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )	$\delta H$ (m)	$\delta_{\text{oed}}$ (mm)
1	0.05335	2	4.8
2	0.02095	1.5	2.1
3	0.007	1.0	0.4
4	0.004	3.5	1.0
5	0.0022	3	0.4
Penurunan total =			8.7 mm



tanah dan derajat konsolidasinya, selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.

Pelaksanaan pembuatan blok fondasi dan struktur atas dilakukan segera setelah pembongkaran timbunan. Beberapa alat pemantau penurunan dipasang pada fondasi kolom luar dan kolom dalam dengan hasil seperti pada tabel 6.

Tabel 6. Penurunan pada kolom selama pelaksanaan struktur (mm)

Waktu (Hari)	D1 (luar)	H1 (luar)	K9 (dalam)	F9 (dalam)	C9 (dalam)	B5 (luar)	H5 (luar)
0	0	0	0	0	0	0	0
7	— 1	0	0	0	— 1	0	0
14	2	0	2	2	3	2	0
21	2	2	2	3	3	1	0
28	1	0	3	2	3	2	0
35	2	0	2	3	2	3	2

#### Pembahasan

Begitu beban diberikan, tekanan air pori naik secara cepat di semua kedalaman (Gambar 7). Kelebihan tekanan air pori maksimum tercatat pada piezometer P1 dan P2 sekitar 50% dari beban yang diberikan, sedangkan pada piezometer P2 sekitar 16%. Kelebihan tekanan air pori hilang seluruhnya pada P2 setelah 15 hari, tetapi pada P1 dan P3 baru mencapai 74% dan 60% ketika timbunan dibongkar (30 hari). Secara umum derajat konsolidasi seluruh lapisan-lapisan pada 30 hari pembebanan diperkirakan telah mencapai 85%, sehingga telah memenuhi kriteria bahwa pra-pembebanan efektif jika pada derajat konsolidasi lebih dari 55%. Proses konsolidasi lebih lambat pada lapisan bagian bawah yang dekat dengan lapisan batuan, sedangkan di bagian atas proses konsolidasi lebih cepat karena diperkirakan terjadi drainasi dua arah.

Penurunan dari muka tanah, terjadi dengan cepat pada awalnya dan kemudian turun. Penurunan mendekati berhenti setelah mencapai waktu lebih dari 30 hari. Penurunan akhir pada pra-pembebanan sebelum beban dibongkar berkisar antara 145 sampai 220 mm, mayoritas penurunan terjadi pada tanah urug dan lapisan kompresibel setebal 5 meter di bagian paling atas.

Jika penurunan akibat pra-pembebanan dan pengembangan setelah timbunan dibongkar dinormalisasikan terhadap beban vertikal 70 kN/m<sup>2</sup> dan 30 kN/m<sup>2</sup>, rangkuman hasil ditunjukkan pada tabel 7. Normalisasi terhadap beban vertikal 70 kN/m<sup>2</sup> sesuai tekanan fondasi kolom, penurunan berkisar antara 133 — 176 mm dengan rata-rata 154 mm dan perbedaan penurunan maksimum sebesar 16 mm antara ekstensometer ME1 dan ME2 yang berjarak 10 meter.

Jika penurunan yang tercatat dinormalisasi ke beban 30 kN/m<sup>2</sup> (beban rencana lantai), penurunan berkisar antara 57 — 75 mm dengan rata-rata 66 mm dan perbedaan penurunan maksimum sebesar 7 mm atau dengan kemiringan distorsi 1:1500.

Pengamatan pengembangan dalam waktu lebih dari satu minggu tidak dapat dilaksanakan karena terganggu pelaksanaan fondasi dan pelat lantai, tetapi dari pengamatan menunjukkan bahwa pengembangan segera (primer) telah selesai.

Pengalaman (Samson dan La Rochelle, 1972) menunjukkan bahwa pengembangan akan terus terjadi secara lambat selama periode mendekati sama dengan waktu pra-pembebanan sekitar 30 — 35 hari. Anggapan beban rata-rata kolom sama dengan beban rencana lantai 30 kN/m<sup>2</sup> mungkin terlalu konservatif karena sebetulnya tergantung pada intensitas beban dan ukuran fondasi, tetapi hal ini dirasa masih cukup beralasan. Pemantauan selanjutnya menunjukkan bahwa penurunan fondasi kolom berkisar antara 0 — 3 mm dan diharapkan penurunan dari pelat lantai akan sangat kecil.

Perkiraan awal penurunan kolom dan pelat lantai setelah pra-pembebanan berdasarkan kurva balik (pengurangan beban) pengujian konsolidasi laboratorium. Analisis balik dari kurva balik pra-pembebanan menunjukkan bahwa tanah yang mengalami pra-konsolidasi kemungkinan lebih kaku. Kedua pendekatan yang menganggap modulus pembebanan ulang sama dengan modulus pada pengurangan beban umumnya dinilai konservatif, karena penurunan pada tanah yang telah mengalami pra-konsolidasi akan terjadi cepat, *quasi-elastic*, dan terjadi pada awal pembebanan. Hasil analisis berdasarkan penyelidikan tanah dan pra-pembebanan dibandingkan dalam tabel 8.

Kenyataannya, kurva pembebanan ulang akan lebih mendekati garis (a) (Gambar 8) daripada (b),

sehingga penurunan akan lebih kecil dari yang diperkirakan berdasarkan kurva balik. Di samping itu, tanah di bagian bawah kemungkinan telah mengalami pra-konsolidasi sehingga penurunan kolom terbatas pada lapisan setebal 5 meter bagian atas.

Publikasi khusus dari CIRIA no. 27 (1983) menyatakan bahwa perbedaan penurunan sebesar 20 mm masih dapat ditolerir antara kolom satu dengan yang lain pada struktur baja, dan perbedaan penurunan tidak melebihi 75% dari penurunan total. Sedangkan penurunan maksimum yang masih dapat ditolerir sekitar 25 mm untuk telapak terpisah (*individual footing*). Penurunan yang diramalkan dan yang diamati di lokasi penelitian ternyata cukup aman, jauh di bawah yang disyaratkan.

### Kesimpulan

Dari studi ini, beberapa kesimpulan dan kesan yang dihasilkan sebagai berikut.

1. Kekuatan tanah mampu mendukung beban yang direncanakan, tetapi penurunan yang mungkin terjadi melebihi batas yang ditolerir, sehingga dilakukan perbaikan.
2. Penggunaan nilai  $C_u$  hasil pengujian konsolidasi di laboratorium untuk tanah dari lokasi penelitian terlalu kecil dibandingkan dengan di lapangan, sehingga pengurangan kelebihan tekanan air pori di lapangan jauh lebih cepat. Hal ini dikarenakan kondisi tanah yang berlapis-lapis tipis (*laminated clays*).
3. Pra-pembebanan di lokasi penelitian berhasil sukses, penurunan yang tercatat selama dan setelah pelaksanaan sangat kecil. Dengan kondisi tersebut, fondasi setempat (*individual spread footing*) memungkinkan digunakan pada tanah yang diperbaiki dengan pra-pembebanan.
4. Hitungan berdasarkan data laboratorium menghasilkan penurunan lebih besar dibanding yang diperkirakan dari pra-pembebanan dan kedua hitungan tersebut hasilnya lebih besar dibanding dengan penurunan bangunan yang sebenarnya.
5. Di Indonesia yang areal tanah lunaknya sangat luas, perbaikan tanah dapat menggunakan pra-pembebanan.

### Daftar Pustaka







- Adi, A.D. (1989). *Geotechnical characteristics of Recent Alluvium and Application of Pre-loading*, M.Sc. Dissertation, The University of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne (UK).
- Berry, P.L. (1983). *Application of Consolidation Theory for Peat to The Design of A Reclamation Scheme by Pre-loading*, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 16.
- Samson, L. and La Rochelle, P. (1972). *Design and Performance of An Expressway Constructed Over Peat by Pre-loading*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9.

Tabel 7. Normalisasi dari penurunan dan pengembangan

Location	ME6	ME5	ME4	ME3	ME2	ME1
Surcharge Loading	70 kN/m <sup>2</sup>	85 kN/m <sup>2</sup>	100 kN/m <sup>2</sup>	100 kN/m <sup>2</sup>	85 kN/m <sup>2</sup>	70 kN/m <sup>2</sup>
Observed Settlement mm	145	162	205	220	195	176
Normalized to 70 kN/m <sup>2</sup> mm	145	133	143	154	160	176
Normalized to 30 kN/m <sup>2</sup> mm	62	57	61	66	68	75
Observed Rebound mm	30	30	35	40	27	14
Normalised to 70 kN/m <sup>2</sup> mm	30	26	24	28	23	14
Normalized to 30 kN/m <sup>2</sup> mm	13	10	10	12	9	6

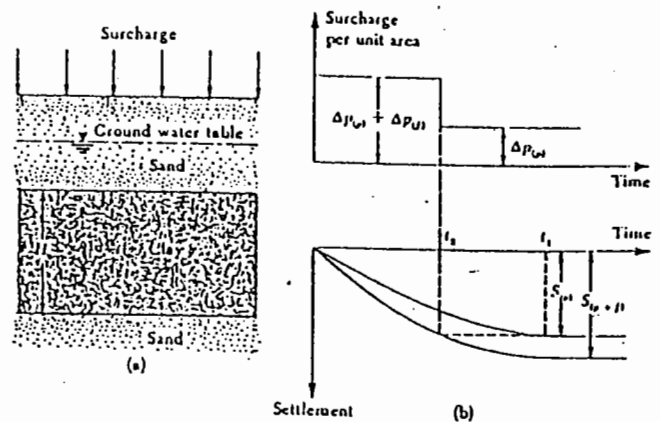
Tabel 8. Perkiraan Penurunan dan Hasil Pengamatan

Structure	Loaded Area	Found. Press.	Settlement mm		
			Estimated		Obs.
	m × m	kN/m <sup>2</sup>	from SI	Pre-load	
Int Col	3 × 3	68.9	15	10	2-3
Ext Col	1.25 × 1.25	73.6	9	13	0-3
Floor slab	45 × 30	30	23	12	0-3

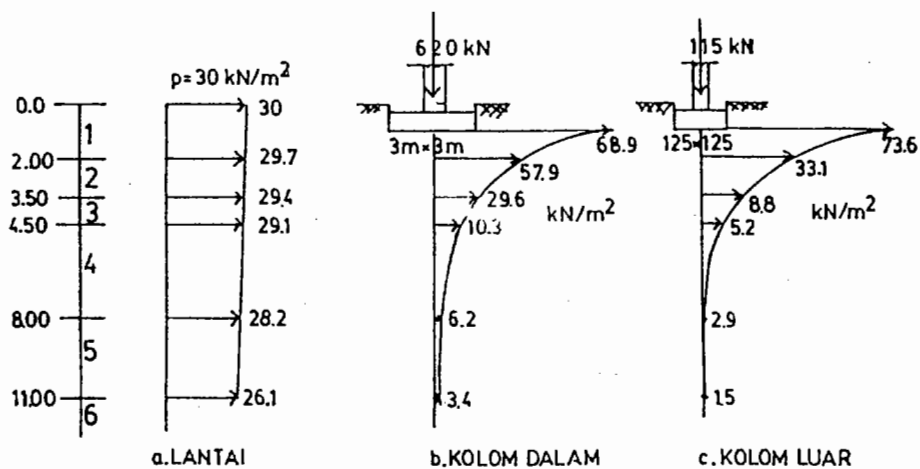
Kedalaman	Jenis tanah	S (kN/m <sup>2</sup> )	m <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> MN)	Lapisan ke-
0.0		—	0.6	1
200		20	0.6	2
350		15	1.85	3
450		36	0.3	4
800		66	0.3	5
1100		250	< 0.1	6

$m_v$  = coefficient of volume change  
 $s_u$  = undrained shear strength

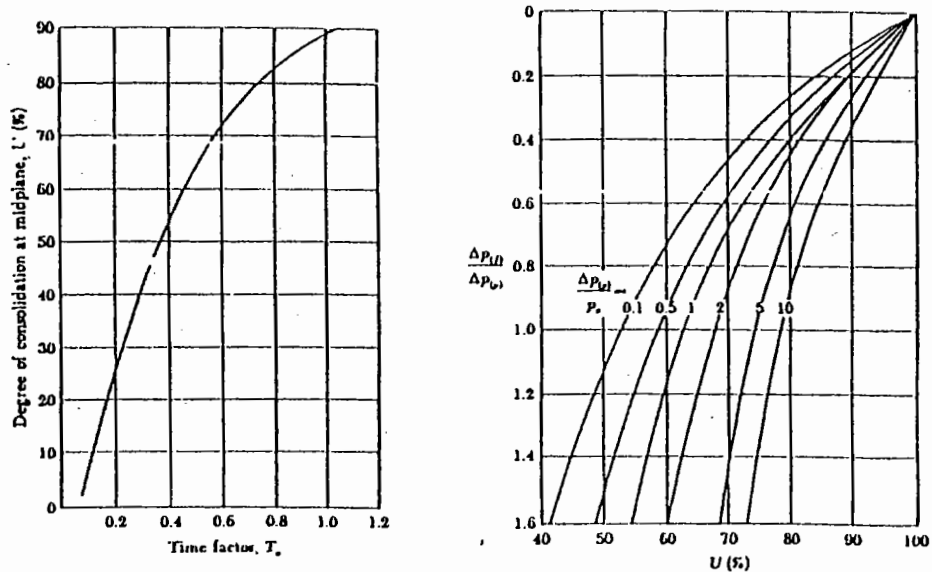
Gambar 1. Rangkuman data tanah



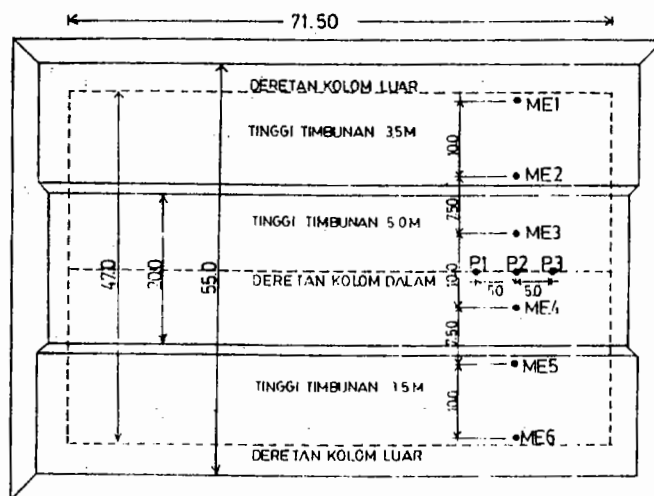
Gambar 3. Prinsip kerja pra-pembebanan



Gambar 2. Penyebaran beban bangunan rencana

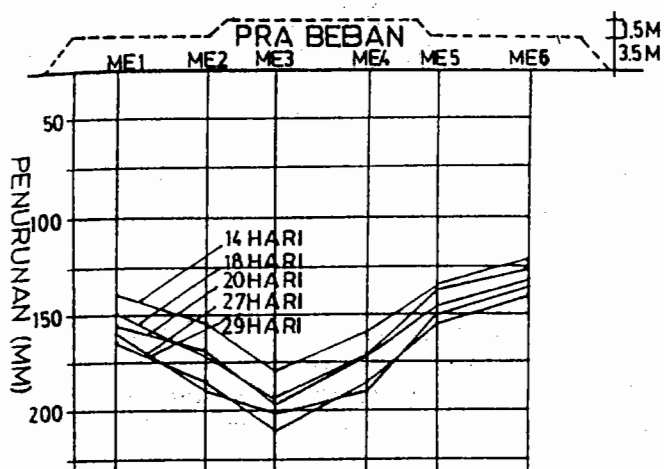


Gambar 4. a. Kurva konsolidasi vs  $T_v$   
b. Kurva  $p_f/p_p$  vs  $U$  (Das, 1984)

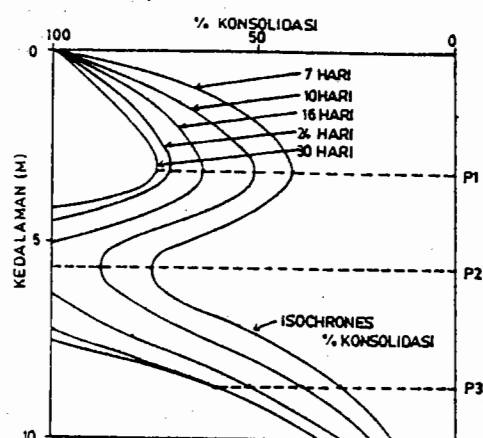


Gambar 5. Skema pra-beban dan lay-out alat pantau  
(jarak dalam meter)

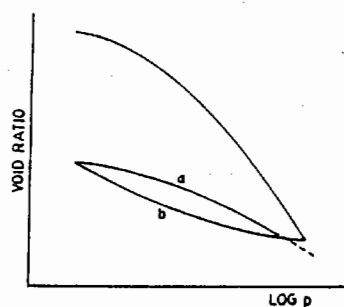




Gambar 6. Kurva penurunan muka tanah



Gambar 7. % konsolidasi dengan waktu



Gambar 8. Tipikal kurva konsolidasi berulang